DOI:10.15928/j.1674-3075.202011130323

梯级开发对家鱼产卵场高低流量过程的影响

曹艳敏[1],王崇宇[2],乾东岳[3]

(1. 湖南城市学院 土木工程学院,湖南 益阳 413000;
2. 湖南省水务规划设计院有限公司,湖南 长沙 410008;
3. 交通运输部天津水运工程科学研究院,天津 300456)

摘要:产卵场特有的水力条件是四大家鱼繁衍的重要影响因素,尤其是流量脉冲引发的流速上涨是刺激家鱼产卵、保证鱼卵孵化的关键水力因子;流域梯级开发改变了天然河道的流量脉冲过程,导致产卵场破碎萎缩、苗量锐减。为揭示梯级开发对湘江干流四大家鱼产卵场水力特征的影响机理,建立了湘江干流家鱼产卵场二维数值模型,模拟了梯级开发前后典型高低流量脉冲过程,分析梯级开发对鱼类产卵场的影响。结果表明,梯级开发后,水流结构复杂性减弱甚至消失,高、低流速脉冲过程变得"尖锐",流速上涨时间缩短 50%(高流量脉冲)和 67%(低流量脉冲),高流量过程的 "喜好流速"或"触发流速"基本消失,低流量过程大部分流速均低于"腰点流速";对流速上涨过程中平均流速分级水域面积统计表明,低于"腰点流速"面积分别扩大至 3.0 倍($Q_{高}$)和 3.2 倍($Q_{低}$),"感应流速"范围水域面积减少至天然情况的 15.8%($Q_{高}$)和 1.2%($Q_{低}$),"触发流速"范围面积减小至天然情况的 1.5%($Q_{高}$)和 1.6%($Q_{低}$),"喜好流速"范围面积减小至天然情况的 2.0%($Q_{高}$)和 3.1%($Q_{低}$)。研究结果可为鱼类资源保护和恢复等措施提供参考和依据。

关键词:梯级开发;四大家鱼;产卵场;流量脉冲;水力特征
中图分类号:X171.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2022)03-0018-09

四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢、鳙)是我国主要淡水养殖和捕捞鱼类(李翀等,2007),也是半洄游性鱼类,鱼卵为漂流性,亲鱼在繁殖季节洄游一定距离,到一些环境条件适宜的江段产卵(中国科学院水生生物研究所,1960)。产卵场的流场(易伯鲁和梁轶燊,1964)、温度场(骆辉煌,2013)、水环境场(余杨,2013)等生境条件是刺激家鱼产卵、保证鱼卵孵化和鱼苗存活的关键因素,决定了鱼类的丰度及分布;其中,产卵场的水力条件是刺激家鱼产卵的重要因素之一,江面水流多由流向不同的水流交错而成,局部出现洄流区域,流速的上涨刺激家鱼产卵,当流速稳定或减少时,"鱼卵"断江(易伯鲁和梁轶燊,1964);同时,需要适宜的流速范围(易伯鲁,1988;易雨君,2018),如下限流速宜维持在"腰点"流速以上,以便鱼卵及刚孵化的鱼苗不会下沉(曹文宣等,1987);较高的流速值是刺激家鱼产卵的有效流速(陈永柏等,2009)。流量脉冲这种非恒定流过程可以使流速上涨,刺激家鱼产卵,而已有研究均以恒定流作为模拟家鱼产卵场水力特征的输入条件,不符合刺激家鱼产卵的实际情况(班璇和李大美,2007;王远坤等,2009;李建等,2013)。

流域梯级开发可以有效配置水资源,并开发流域的防洪、发电、灌溉、航运等功能。我国大部分流域都形成了梯级开发模式,如长江、金沙江、汉江、湘江及赣江流域(曹艳敏,2019)。这些流域不仅具有丰沛的水资源,同时还具有丰富的鱼类资源(曹文宣等,1987;邹淑珍,2011;段辛斌等,2015;雷欢等,2018)。梯级开发对流域生态系统产生一定的影响,枢纽蓄水发电将明显改变库区河道的水力特性,鱼类产卵特定的水流环境发生变化,现有研究主要集中在以葛洲坝、三峡枢纽为代表的梯级开发对枢纽下游鱼类的影响(付小莉等,2006;郭文献,2008;班璇和肖飞,2014),缺乏梯级开发全区域化研究。

本文以湘江干流为例,建立四大家鱼产卵场河段数值模型,选取典型的高低流量脉冲过程,开展梯级开发前后的非恒定流过程计算,并对水力特性进行对比分析,深入研究梯级开发对家鱼产卵场及其水力特性的影响,可为鱼类资源保护与恢复提供参考和依据。

收稿日期:2020-11-13 **修回日期**:2022-04-07

基金项目:湖南省自然科学基金(2021JJ40026);湖南省教育厅科学研究项目(21C0651);益阳市哲学社会科学重大课题(2022YS011)。

作者简介:曹艳敏,1983年生,女,理学博士,讲师,工程师,主要从事生态水力学、水环境及水文水资源教研工作。E-mail: 179276781@qq.com

1　湘江流域概况

1.1　梯级开发

为充分发挥湘江水资源优势，促进经济快速发展，湖南省国土委员会于1986年编制了以发电、航运为主，结合灌溉、防洪、环境保护等水资源综合利用要求，按梯级进行开发的《湘江干流规划》，至2016年土谷塘建成，湘江建成了永州至长沙的8级梯级，自上游往下依次为潇湘、浯溪、湘祁、近尾洲、土谷塘、大源渡、株洲、长沙。湘江干流四大家鱼产卵场位于湘祁枢纽（2012年建成）、近尾洲枢纽（2002年建成）、土谷塘枢纽（2015年建成）之间，均为径流式、日调节型电站，研究区域位置见图1。



图1　研究区域位置

Fig.1　Location of the study area

1.2　四大家鱼现状

湘江是长江中游的重要支流之一，也是湖南省境内最大的河流。湘江干流四大家鱼产卵场位于常宁张河铺至衡阳云集河段，该产卵场是全国3个四大家鱼产卵场之一，其天然鱼苗产量约占全国1/4（唐家汉和黄冬生，1981）。随着湘江干流梯级开发相继建成蓄水，原有88 km长的湘江四大家鱼产卵场已逐渐萎缩，出现产卵场破碎化（丁德明等，2010）。根据2009—2010年调查分析，原有的湘江干流四大家鱼产卵场目前已萎缩破碎为大堡、柏坊、松江、渔市4个产漂流性产卵场（谢文星等，2014）。

20世纪60年代湘江干流并无航电梯级开发，河流为天然状态，湘江干流家鱼产卵场鱼苗（鱼卵）量为14.58亿尾（粒），丰水年产卵繁殖规模在1亿尾以下，平水年为0.5亿尾左右（唐家汉和黄冬生，1981）。在早期的湘江梯级开发中，大源渡枢纽（1999年建成）、株洲枢纽（2005年建成）、近尾洲枢纽（2002年建成）均未建设鱼道，在一定程度上阻断了鱼类洄游通道，造成了鱼类资源的衰退。近年来，产卵场汛期每次产卵量平均约0.134亿粒（高万超等，2019），仅为20世纪60年代产卵量的3.4%～6.8%，产卵量及鱼苗量锐减。

2　研究方法

2.1　高低流量脉冲过程

Nancy等（2004）提出了环境水流(Environmental Flow)的概念，其水流分组根据年内不同，水文情势可以划分为低流量（low flow）、高流量（high flow）和洪水流量（flood flow），各分组对应不同的生态意义（表1）。

本文高低流量参考张爱静等(2013)，对归阳水文站（研究区域上边界）1961—2018年时间序列内逐日流量进行划分得出：$Q_{低}$≤461 m³/s，764 m³/s≤$Q_{高}$≤7 530 m³/s。借鉴丁德明等（2010）湘江干流四大家鱼产卵期现场调查结论，将4–7月作为湘江干流四大家鱼产卵期，选取2018年6月7–12日作为典型高流量过程（$Q_{起始}$为748 m³/s，$Q_{峰值}$为3060 m³/s，$Q_{终止}$为862 m³/s），2018年6月28日至7月3日（$Q_{起始}$为379 m³/s，$Q_{峰值}$为455 m³/s，$Q_{终止}$为335 m³/s）作为典型低流量过程进行模拟。本文拟选用的高低流量脉冲过程示意见图2。

2.2　数值模型

采用丹麦水力研究所开发的DHIMIKE 21建立二维非恒定流的水动力学模型，通过解算不可压缩流体沿水深积分的雷诺平均Navier Stokes方程，模拟天然河道和有梯级开发情况下典型高低流量脉冲过程。

模型范围为湘江干流归阳水文站至衡阳水文站，共137 km（图3）。根据河道地形特点合理布置计算网格，本文采用三角形网格对计算区域进行网格划分（图4），共计146 440个三角形网格，计算节点77 725个，并在产卵场区域进行网格加密。模型底床糙率为0.020～0.025，边滩糙率为0.025～0.028，在河道地形复杂的大堡、柏坊产卵场底床糙率为0.027。考虑到模拟范围较大，模型中引入科氏力，时间步长设为Δt=60 s。

表 1 环境水流分组对河流生态系统的意义

Tab.1 Significance of environmental flow components to river ecosystem

水流分组	河流栖息地响应	生态影响
低流量过程	流速缓慢，水流在主河槽流动，水位较低。	11-3 月，保证河道维持基流，使河流具有连续性；为越冬的水生生物提供基本的栖息、觅食空间；4-7 月，保证鱼卵漂浮在水面得以存活，为鱼类提供洄游通道。
高流量过程	流速增加，水位、河宽增加，泥沙输移增加。	鱼类繁殖生长和植被生长的关键时期；4-7 月刺激鱼类产卵繁殖，扩展水生生物栖息地的面积和食物来源。
洪水脉冲过程	洪水脉冲过程来流大，溢出主河道，联通滩区与主河道。	促进主河道与河漫滩之间的物质循环和能量交换，为鱼类提供繁殖场所，并提供更充足的食物来源；形成河道-滩地系统，该动态联通系统具有高度的空间异质性。

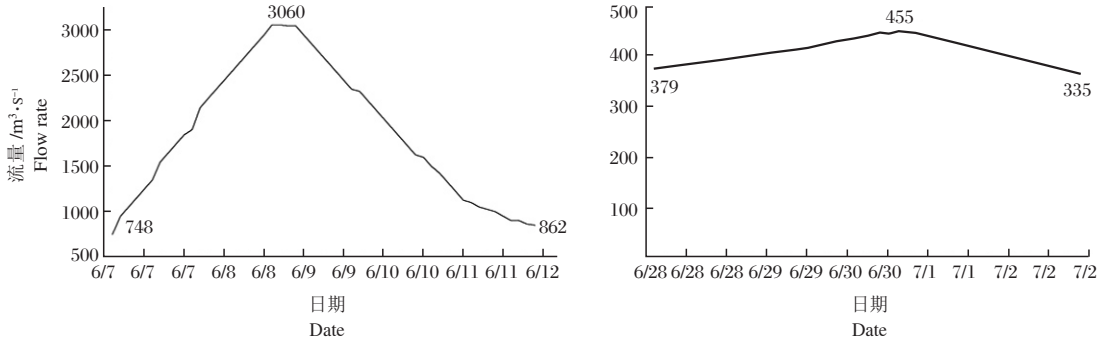


图 2 高低流量脉冲过程

Fig.2 Schematic diagram of high and low flow pulse process

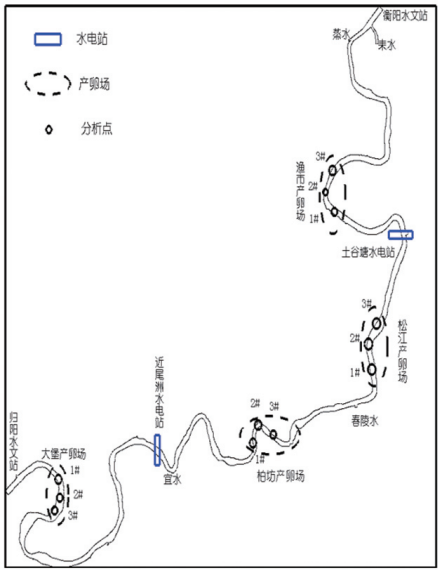


图 3 模型总体平面图

Fig.3 Model overall plan

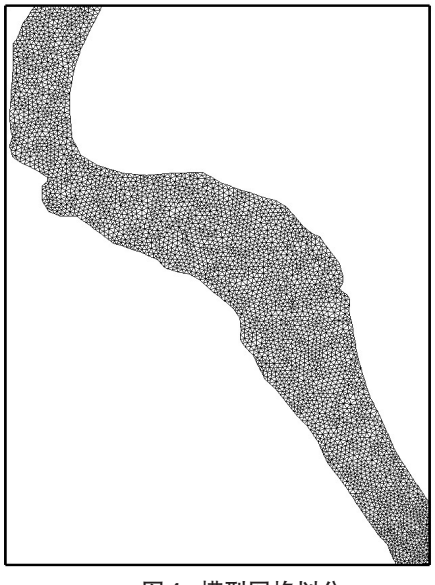


图 4 模型网格划分

Fig.4 Schematic diagram of model grid division

考虑到模型长度较长，分两段进行验证：上游段为归阳水文站至近尾洲水电站，长度 43 km，采用近尾洲水库回水计算成果进行验证（湖南省水利水电勘测设计研究总院，1999）；下游段为近尾洲水电站至衡阳水文站，长度 94 km，采用土谷塘航电枢纽坝址附近布置的水尺实测值进行验证（交通运输部天津水运工程科学研究院，2010）。验证结果表明，水位验证差值为−0.06～0.07 m，具有较高的可信度。采用验证后的模型，对选取的流量脉冲过程分别进行了天然河道情况和梯级开发后的两种工况计算。

2.3 数据分析

考虑平面二维模型的特点，主要对流速变化特征开展时间及空间角度的分析，包括峰值流量下流场、典型点脉冲流量过程及流速上涨过程、分级流速水域面积分析3个方面。针对不同流速对四大家鱼产卵的意义，按照表2对不同界限流速进行了初步分级。

表2 不同分级流速对鱼类产卵的意义

Tab.2 Significance of different velocities for fish spawning

流速	流速与范围值/m·s^{-1}	对鱼类产卵的意义
腰点流速	0.20	家鱼鱼卵和鱼苗需要流速维持在0.20 m/s以上，以便不下沉（曹文宣等，1987），“腰点流速”也可认为是产卵及鱼卵孵化的下限流速。
感应流速	0.86~1.11	不同流速对亲鱼产卵行为会产生不同的影响，流速小于0.86 m/s时，亲鱼几乎没有产卵行为（张予馨，2017）；流速在0.86~1.11 m/s，亲鱼逐渐发生产卵行为，称为产卵的“感应流速”范围。
触发流速	1.11~1.49	流速在1.11~1.49 m/s，亲鱼会逐渐出现产卵活动，称为产卵的“触发流速”范围。
喜好流速	1.40~1.60	适宜亲鱼产卵，是产卵的“喜好流速”范围。

分析高低流量脉冲过程的计算结果，首先得出每个模拟网格流速上涨过程的平均流速，然后统计不同分级流速的水域面积，计算公式如下：

$$S_{x\sim(x+\Delta x)}=\sum s(x<v\leqslant x+\Delta x)$$

式中：S为分级流速汇总面积（m^2），x为流速分级点，v为单元格平均流速（m/s），s为单元格面积（m^2）。

参考表2不同分级流速对鱼类产卵的意义，分别开展以下几组流速分级分析：（1）“腰点流速”以下（0~0.2 m/s）；（2）“腰点流速”至感应流速下限（0.20~0.86 m/s）；（3）“感应流速”范围；（4）“触发流速”范围；（5）“喜好流速”范围。

3 结果与分析

3.1 流场

成熟亲鱼需要在特定的水力条件中获得刺激而产卵。因此，复杂的洄流、乱流及泡漩水是家鱼产卵所必需的流向条件（中国科学院水生生物研究所，1960）。

图5为大堡产卵场高流量脉冲过程中峰值流量时的瞬时流场矢量图。天然情况下，大堡产卵场在洲岛附近有流向不同的水流交错，且局部有洄流出现，这是刺激家鱼产卵最适宜的流场特征（易伯鲁和梁轶燊，1964）。梯级开发后，受近尾洲枢纽回水影响，水位抬高，洲岛面积缩小，库区范围内流速值明显减少；同时，水位抬高后，江中乱石暗礁被淹没，水流交错程度减弱，洄流流速减小，部分洄流和乱流消失。

图6为柏坊产卵场高流量脉冲过程中峰值流量时的流速等值线。天然情况下，部分短程江段，河道弯曲而狭窄，有突出江心的洲岛，水流结构复杂且流速值高，达到1.6～2.0 m/s，局部区域流速超过2.0 m/s，这将成为家鱼稳定产卵场的特有条件。梯级开发后，水流结构的复杂程度减弱，同时流速值减少至1.4 m/s（“喜好流速”下限）以下，高流速值区域消失。在河道狭窄地区如松江产卵场，梯级开发后流速由1.6~0.4 m/s降为0.8~0.4 m/s，高流速值水域面积大幅下降。

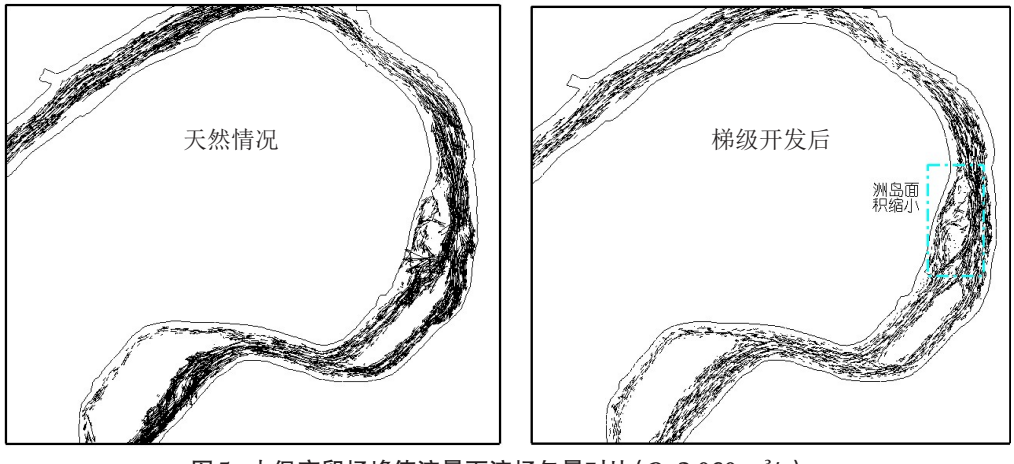


图5 大堡产卵场峰值流量下流场矢量对比（Q=3 060 m^3/s）

Fig.5 Comparison of velocity vector diagram of the Dabao spawning ground under peak flow（Q=3 060m^3/s）before and after hydropower development

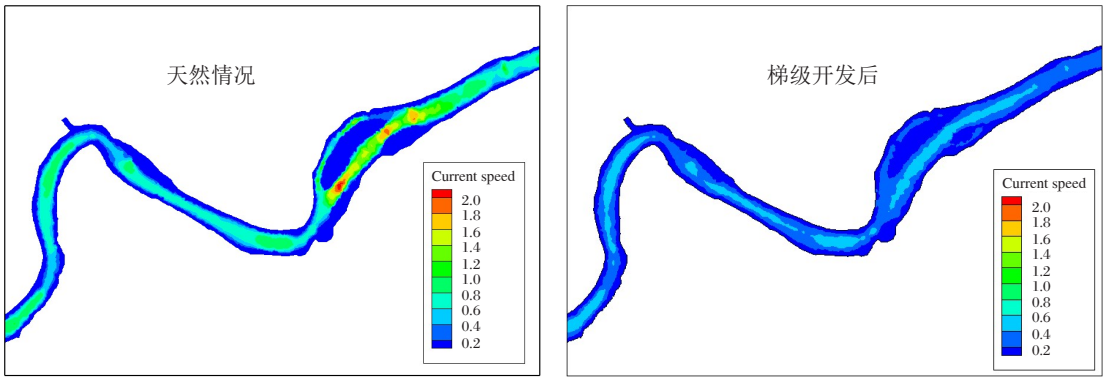


图 6　柏坊产卵场峰值流量下流速等值线对比（Q=3 060 m³/s）

Fig.6　Comparison of velocity contour map of the Baifang spawning ground under peak flow（Q=3 060 m³/s）before and after hydropower development

3.2　产卵场流速变化

流速上涨具有刺激家鱼产卵的功效，并且上涨时间越长，刺激产卵的效果越强（易伯鲁和梁轶燊，1964；易伯鲁，1988）。为分析梯级开发前后流量过程中产卵场流速变化，分别选取了柏坊、松江产卵场的 3 个典型点进行分析，其中 1 号点位于产卵场的上游部、2 号点位于中部、3 号位于下游部。图 7 和图 8 分别为梯级开发前后柏坊和松江产卵场高低流量过程特征点位置的流速对比。

高流量过程下，梯级开发后柏坊和松江产卵场流速上涨过程由天然的 3 d 缩短至 1.5 d，时间缩减了 50%，流速的脉冲过程变得“尖锐”，流速上涨过程时间缩短，不利于刺激家鱼产卵。高流量过程中，流速较天然情况下明显下降，以松江产卵场 1 号为例，天然情况下有 66 h 间段流速可以达到“触发流速”范围，但梯级开发后，流速全低于“感应流速”的下限值（0.86 m/s）。

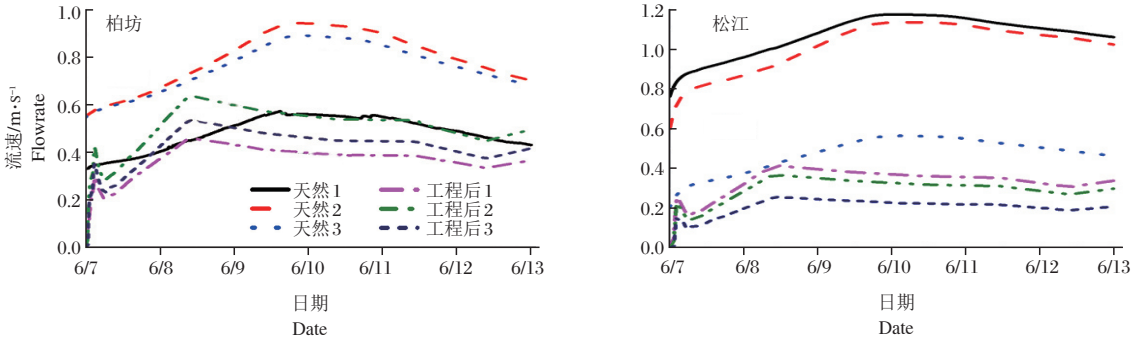


图 7　高流量脉冲下柏坊和松江产卵场典型点流速变化过程

Fig.7　Typical point flow velocity changes in Baifang and Dabao spawning grounds under high flow pulse

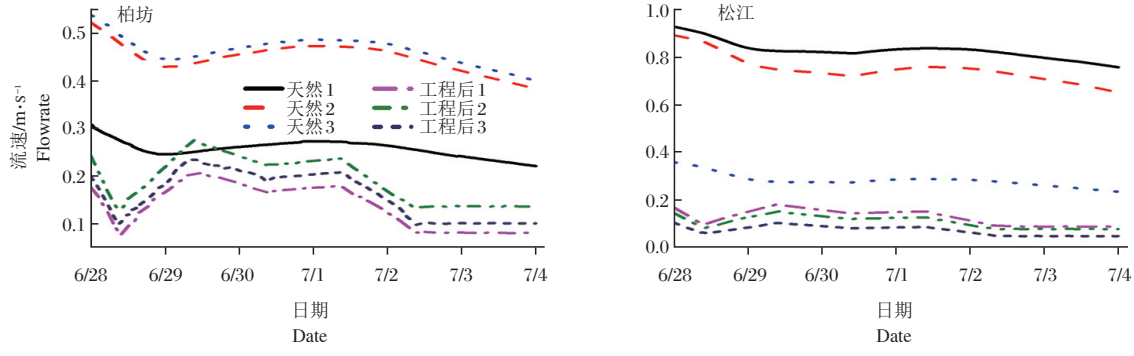


图 8　低流量脉冲下柏坊和松江产卵场典型点流速变化过程

Fig.8　Typical point flow velocity change process in Baifang and Dabao spawning grounds under low flow pulse

低流量过程下，梯级开发使得整个低流量脉冲过程分裂为2次流速脉冲过程并变得“尖锐”，流速上涨过程时间缩短。低流量过程的流速是否达“腰点流速”也很关键，同时也是确保产出的鱼卵不下沉、成长为鱼苗的重要水力要素。天然情况下的低流量脉冲过程，库区回水范围及两梯级之间的产卵场（柏坊、松江），约45%时段的流速值尚能维持在鱼苗“腰点流速”0.20 m/s 以上，梯级开发后整个过程的流速均低于鱼苗“腰点流速”。

3.3　分级流速水域面积

图9、图10分别为高、低流量过程下的归阳水文站至近尾洲河段、近尾洲至土谷塘河段、土谷塘至衡阳水文站、全河段分级流速面积对比。

高流量过程分级流速水域面积对比显示，梯级开发后，库区河段（归阳–近尾洲、近尾洲–土谷塘）低于“腰点流速”0.20 m/s 的水域面积明显增大，位于枢纽下游的河段（土谷塘–衡阳）低流速面积变化相对较小；感应流速、触发流速、喜好流速水域面积，相比

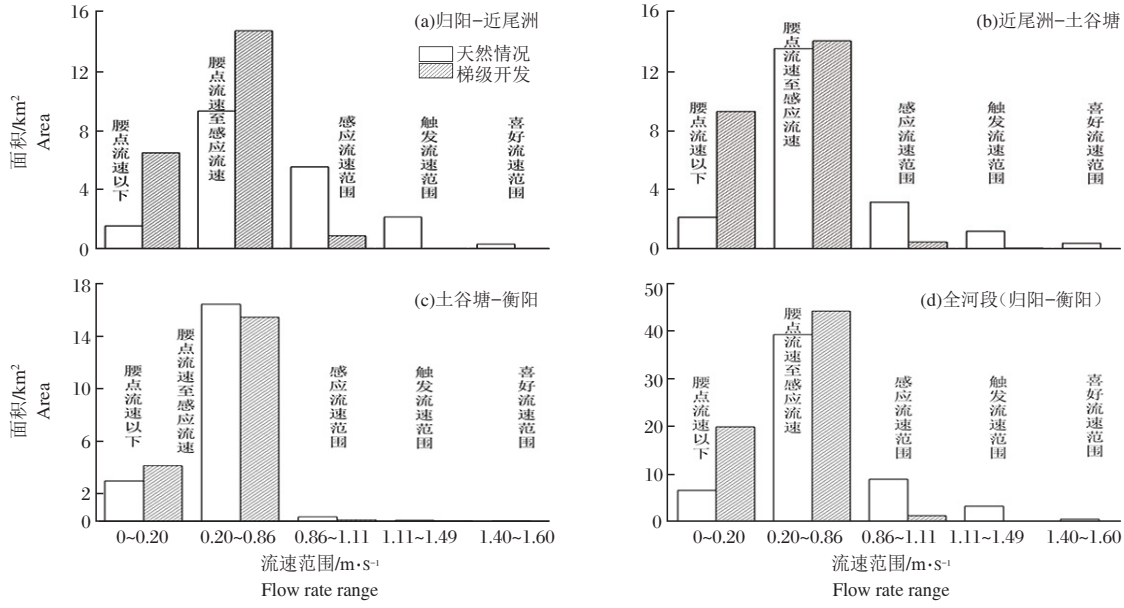


图9　高流量脉冲分级流速面积对比

Fig.9　Comparison of different velocity areas under high flow pulse

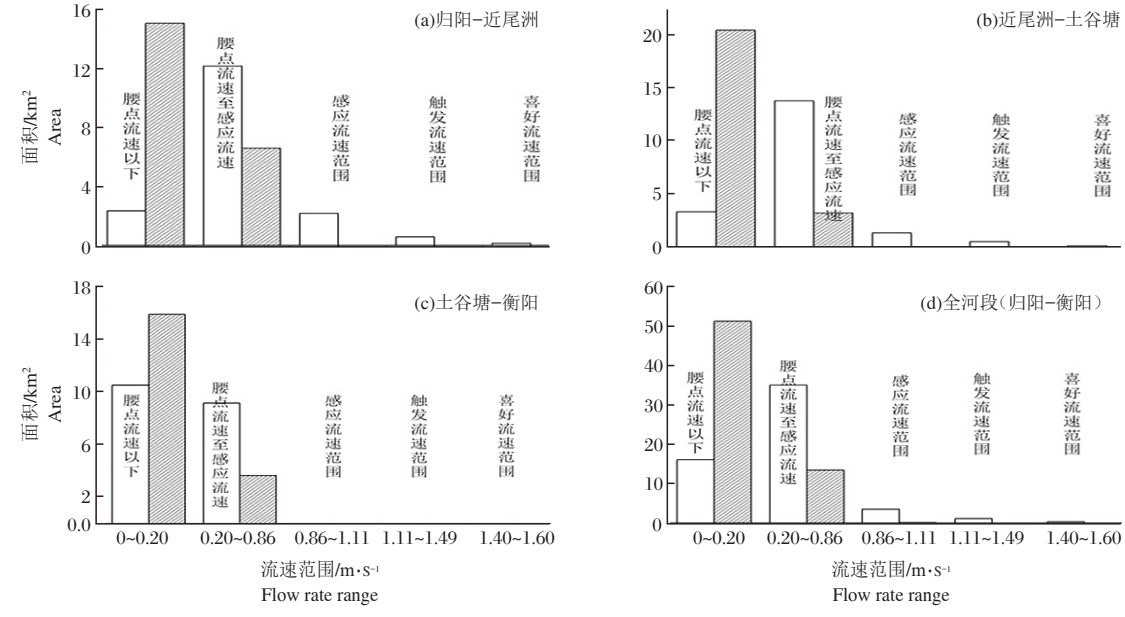


图10 低流量脉冲分级流速面积对比

Fig.10 Comparison of different velocity areas under low flow pulse

天然情况，梯级开发后下降明显；流速0.20~0.86 m/s的水域面积，在产卵场各区段有升有降。整体来看，梯级开发对高流量脉冲过程的影响较大，枢纽蓄水大大降低了该河段的流速，其中流速低于0.20 m/s的水域面积增大至3倍；流速位于感应流速、触发流速、喜好流速范围的水域面积缩小至原有的15.8%、1.5%、2.0%。

低流量过程分级流速水域面积对比显示，整体来看，梯级开发对低流量脉冲过程的影响很大。流速低于0.20 m/s的水域面积增大至3.2倍，流速0.20~0.86 m/s的水域面积缩小至原有的38.4%。感应流速、触发流速、喜好流速水域面积，相比天然情况，梯级开发后基本消失，3种流速范围的水域面积缩小至原有的1.2%、1.6%、3.1%。

此外，关于梯级开发对不同河段的影响程度，库区河段（归阳–近尾洲、近尾洲–土谷塘）由于枢纽的蓄水导致水位大幅上升，尤其是枢纽前河段，流速降低幅度大，而位于枢纽下游的河段（土谷塘–衡阳）影响相对较小。

4 讨论

4.1 非恒定流分析产卵场水力特征的适宜性

本研究以湘江干流产卵场为对象，选取典型的高低流量脉冲过程，建立平面二维非恒定流数值模型，开展天然河道和梯级开发后2种工况进行模拟，该研究方法能直观模拟出流量变化过程，从结果来看，考虑时间过程的流量、水位、流速变化，与天然流量情况更为贴合，计算结果与相关物理模型、原型观测的数据吻合性良好。由于平面二维模型的局限性，数据分析主要以流场、流速和分级流速为主，三维水流结构中的涡量等指标难以开展分析。从长远来看，非恒定流数值分析在生态水力学研究方向具有极大的发展潜力，后续将进一步完善边界条件、优化计算工况并应用到更多的相关研究中。

4.2 梯级开发对产卵场水力特征的影响

已有研究表明，水温、水深、流速、动能梯度等因素均是四大家鱼产卵场的重要水动力因子，本研究采用的平面二维数学模型侧重于流速的变化特征，其中又分别从3个方面进行对比分析。

4.2.1 *流场图比较* 主要分析水流结构的复杂程度，该方式较为常规，与恒定流分析类似，分别提取峰值流量下的矢量图、等值线图进行比较分析，初步认为梯级开发后，库区水位抬高淹没原有乱石暗礁，加之水流速度减缓，使原有复杂的水力结构减弱，甚至消失，不利于刺激亲鱼产卵及鱼卵悬浮孵化，也不利于家鱼鱼卵产卵受精到吸水膨胀这一过程。

4.2.2 *流速变化过程* 流速越大、流速上涨时间越长、腰点以上流速面积越大，均是四大家鱼产卵的良好条件，由于上游梯级的调度作用，会使电站下游区域流速脉冲过程变得“尖锐”，流速上涨时间缩短，分别缩短50%（高流量脉冲）和67%（低流量脉冲），不利于刺激家鱼产卵。梯级上游及梯级间河道流速较天然情况下降，高流量过程下“喜好流速”或“触发流速”基本消失，无法刺激亲鱼产卵；低流量脉冲过程流速甚至低于“腰点流速”，4–7月低流量脉冲需能维持鱼卵的悬浮受精，使孵化鱼苗漂浮存活，低于“腰点流速”则不利于鱼卵孵化及鱼苗存活。

4.2.3 *流速分级水域面积* 对流速上涨过程中平均流速分级水域面积进行统计，低流速对应面积大幅度提升，尤其是低于“腰点流速”面积分别扩大至3.0倍（高流量脉冲）和3.2倍（低流量脉冲），“腰点”以下流速面积扩大，不利于鱼卵孵化和鱼苗漂浮；高流量脉冲过程中，梯级开发后“感应流速”范围水域面积减少至天然情况的15.8%，“触发流速”范围面积减小至1.5%，“喜好流速”范围面积减小至2.0%；低流量脉冲过程，梯级开发后“感应流速”范围水域面积减少至天然情况的1.2%，“触发流速”范围面积减小至1.6%，“喜好流速”范围面积减小至3.1%；高流速面积大幅度下降，即有效刺激家鱼产卵的流速面积减少，不利于刺激亲鱼产卵。

综上，梯级开发对产卵场水流的影响均不利于家鱼产卵，本文采用的非恒定流数值模型较好地分析了梯级开发前后关键水力特性的变化情势。

4.3 补建鱼道是加强鱼类资源保护的有效措施

目前，河流筑坝对鱼类影响的缓解措施主要包括洄游通道的过鱼技术、鱼类三场（产卵场、索饵场、越冬场）的保护及替代、鱼类繁殖及增殖流放、生态流量保证及生态调度工作（陈求稳等，2020）。湘江干流鱼类的保护工作已逐步开展，2012年蓄水的长沙枢纽、2015年建成土谷塘枢纽均修建了鱼道。为切实加强鱼类资源保护，湘江保护和治理委员会2017年第一次全体会议明确，湖南省将进一步落实鱼道建设和补建责任，为鱼类洄游修建生命通道，让其越过大坝，溯流而上，繁衍生息。2020年，依托株洲枢纽、大源渡枢纽二线船闸扩建工程的补建鱼道均已顺利完成，并规划将近尾洲鱼道工程纳入其二线船闸扩建工程项目，计划于2021年开工建设。随着这些鱼道的相继运行，四大家鱼溯游无阻，可望再现“常宁产卵、望城捞苗”的景象，丰富野生鱼类资源。

本研究的相关工作与湘江保护工作相辅相成，正是有了过坝鱼道的恢复，打通了洄游通道，对产卵场水力特性变化的研究更是迫在眉睫，参考本研究成果，进一步开展基于家鱼产卵期需求的脉冲流量生态调度研究，以流速上涨历时、有效刺激家鱼产卵流速面积等各水力项指标作为调度依据，尽量还原刺激家鱼产卵的实际状况，对鱼类资源的保护工作意义巨大。

参考文献

班璇，李大美，2007. 大型水利工程对中华鲟生态水文学特征的影响[J]. 武汉大学学报（工学版），40(3):10-13.

班璇，肖飞，2014. 葛洲坝下游河势调整工程对中华鲟产卵场的影响[J]. 水利学报，45(1):58-64.

曹文宣，余志堂，许蕴轩，1987. 三峡工程对长江鱼类资源影响的初步评价及资源增殖途径的研究[C]//长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集. 北京：科学出版社：3-17.

曹艳敏，2019. 湘江干流梯级开发对家鱼产卵区的影响及其生态补偿研究[D]. 长沙:湖南师范大学.

陈求稳，张建云，莫康乐，等，2020. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J]. 水科学进展，31(5):793-810.

陈永柏，廖文根，彭期冬，等，2009. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J]. 水生态学杂志，30(2):130-133.

丁德明，廖伏初，李鸿，等，2010. 湖南湘江渔业资源现状及保护对策[C]//中国南方渔业学术论坛第二十六次水产学术交流大会论文集. 北京:海洋出版社：122-130.

段辛斌，田辉伍，高天珩，等，2015. 金沙江一期工程蓄水前长江上游产漂流性卵鱼类产卵场现状[J]. 长江流域资源与环境，24(8):1358-1365.

付小莉，李大美，陈永柏,2006. 葛洲坝下游中华鲟产卵河段的流场计算与分析[J]. 水科学进展，17(5):700-704.

高万超，胡可，顾庆福，等，2019. 湘江干流衡阳段与长株潭江段鱼类资源调查与保护对策[J]. 低碳世界,9(7):14-16.

郭文献，2008. 基于河流健康水库生态调度模式研究[D]. 南京：河海大学.

湖南省水利水电勘测设计研究总院，1999. 湖南省近尾洲水电站可行性研究报告[R]. 长沙：湖南省水利水电勘测设计研究总院.

交通运输部天津水运工程科学研究院，2010. 湘江土谷塘航电枢纽工程总体布置优化模型试验研究[R]. 天津：交通运输部天津水运工程科学研究院.

雷欢，谢文星，黄道明，等，2018. 丹江口水库上游梯级开发后产漂流性卵鱼类早期资源及其演变[J]. 湖泊科学，30(5):1319-1331.

李翀，廖文根，陈大庆，等，2007. 基于水力学模型的三峡库区四大家鱼产卵场推求[J]. 水利学报，38(11):1285-1289.

李建，夏自强，戴会超，等，2013. 三峡初期蓄水对典型鱼类栖息地适宜性的影响[J]. 水利学报，44(8):892-899.

骆辉煌，2013. 中华鲟繁殖的关键环境因子及适宜性研究[D]. 北京：中国水利水电科学研究院.

唐家汉，黄冬生，1981. 湘江污染对鱼类资源影响的调查报告[J]. 湖南水产科技，(4):35-39.

王远坤，夏自强，王桂华，等，2009. 中华鲟产卵场平面平均涡量计算与分析[J]. 生态学报，29(1):538-544.

谢文星，唐会元，黄道明，等，2014. 湘江祁阳—衡南江段产漂流性卵鱼类产卵场现状的初步研究[J]. 水产科学，33(2):103-107.

易伯鲁，梁轶燊，1964. 长江家鱼产卵场的自然条件和促使产卵的主要外界因素[J]. 水生生物学集刊，5(1):1-15.

易伯鲁，1988. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼[M]. 武汉:湖北科学技术出版社.

易雨君，2018. 长沙水沙环境变化对鱼类的影响及栖息地数值模拟[D]. 北京：清华大学.

余杨,2013. 三峡水库蓄水初期鱼类中重金属污染研究[D]. 北京：中国水利水电科学研究院.

张爱静，董哲仁，赵进勇，等，2013. 黄河水量统一调度与调水调沙对河口的生态水文影响[J]. 水利学报，44(8):987-993.

张予馨，2017. 长江中游四大家鱼之草鱼产卵行为的生态水力学研究[D]. 重庆：重庆交通大学.

中国科学院水生生物研究所，1960. 1960年长江草、青、鲢、鳙产卵场调查总报告[R]. 武汉：中国科学院水生生物研究所.

邹淑珍,2011. 赣江中游大型水利工程对鱼类及其生态环境的影响研究[D]. 南昌：南昌大学.

Nancy D G, McMahon T A, Finlayson B L, et al,2004. An Introduction for Ecologists[M]. 2nd Edition，John Wiley and Sons，Ltd.

（责任编辑　万月华）

Influence of Cascaded Hydropower Development on High and Low Flows in the Spawning Grounds of the Four Major Chinese Carps

CAO Yan-min[1], WANG Chong-yu[2], QIAN Dong-yue[3]

(1. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, P.R. China;
2. Hunan Water Planning & Design Institute Co., LTD. Changsha 410008, P.R. China;
3. China Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T. Tianjin 300456, P.R. China)

Abstract: The specific hydraulic conditions in spawning grounds are important factors for the reproduction of the four major Chinese carps. The increases in flow velocity caused by natural flow pulses is the key hydraulic characteristic that stimulates spawning and promotes egg hatching. Cascaded hydropower development has changed the flow pulse process that occurred in the natural channel, resulting in the loss and shrinkage of spawning grounds and a sharp decrease in fish fry. In this study, the spawning grounds on the stem of the Xiangjiang River were selected for a case study, and we explored the influence of cascaded hydropower development on the spawning grounds of the four major Chinese carps in Xiangjiang River. A two-dimensional numerical model of a spawning ground was developed to simulate the typical pulses resulting from alternating high and low flows, before and after construction of cascaded hydropower stations. The model was then used to analyze changes in the hydraulics of the spawning grounds as well as the adverse effects of cascaded stations on spawning grounds. Results show that flow structure complexity decreased and even disappeared after cascaded hydropower development. The high and low flow pulses occurred more suddenly, with the time of velocity increase declined by 50% for the high flow pulse and by 67% for the low flow pulse. The favored velocity (induction velocity) beneficial for fish spawning largely disappeared during high flow process, and the flow velocity was mostly lower than the velocity beneficial for eggs hatching and fry drifting during periods of low flow. Hydropower development significantly decreased the flow velocity of the affected river sections, and the water area of different velocity levels decreased. The water area below the lower velocity limit for fish spawning and egg hatching during the high flow period (Q_h) increased by 3 times that before hydropower development and by 3.2 times during the low flow period (Q_l). Compared to natural conditions, the induction velocity area was reduced to 15.8% (Q_h) and 1.2% (Q_l), the triggered velocity area was reduced to 1.5% (Q_h) and 1.6% (Q_l), and the preferred velocity area was reduced to 2.0% (Q_h) and 3.1% (Q_l). In general, hydropower development on Xiangjiang River has altered flow velocities in the spawning grounds of the four major Chinese carps and adversely affected spawning. Furthermore, the two-dimensional numerical model developed in this study worked well for analyzing the hydraulic conditions before and after development of cascaded hydropower. This study will provide reference and evidence for the conservation and recovery of fishery resource.

Key words: cascaded hydropower development; the four major Chinese carps; spawning ground; flow pulse; hydraulic characteristics